



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# KONCEPCE PŘISTÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ

THE CONCEPTION OF LANDING GEAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN GREŇ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. ANTONÍN PÍŠTĚK, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Martin Greň

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Koncepce přistávacího zařízení**

v anglickém jazyce:

### **The conception of landing gear**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Uspořádání a typ přistávacího zařízení patří k významným charakteristikám letounu. Uveďte základní typy a uspořádání, případně s nástinem historického vývoje. Proved'te literární rešerši současných řešení na konkrétních letounech a uveďte výhody a nevýhody jednotlivých uspořádání. Uveďte také důvody, které pro daný letoun, podle vašeho názoru, vedly ke zvolenému řešení.

Cíle bakalářské práce:

Vypracování přehledu koncepcí uspořádání přistávacího zařízení na letounu, popisu výhod a nevýhod jednotlivých řešení a případně odhad, nebo nástin vývoje moderních letounů z hlediska zadané problematiky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Jane's : All the World's Aircraft (všech vydání)
  - [2] časopisecká literatura
  - [3] Tůma, J.: Letadla
  - [4] Niu, M.C.Y: Airframe Structural design
  - [5] Pazmany, L.: Landing Gear Design For Light Aircraft
- Prospekty  
Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2011

L.S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce rešeršního typu se zabývá přehledem koncepcí leteckých přistávacích zařízení. Rozbor bude proveden jako obecný přehled jednotlivých uspořádání s jejich výhodami, nevýhodami a použitím.

## **Klíčová slova**

Podvozek, přistávací zařízení, letoun, tlumiče, brzdy, systémy řízení.

## **Abstract**

This thesis of research type concerns of landing gear conceptions. The analysis will be performed as a general summary of particular conceptions of landing gear, their positives, negatives and usage.

## **Keywords**

Landing gear, airplanes, brake systems, suspension, history.

## **Bibliografická citace**

Greň, M. Koncepce přístávacího zařízení, Vysoké technické učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 41 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Antonína Píšťka, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2012

.....

Martin Greň

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Antonínu Píšťekovi, CSc. za trpělivou odbornou a účinnou pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v mém studiu.

<b>ÚVOD, HISTORICKÝ VÝVOJ</b>	<b>10</b>
<b>POŽADAVKY KLADE NÉ NA PODVOZEK:</b>	<b>11</b>
<b>ROZDĚLENÍ PODLE DRUHU PROSTŘEDÍ</b>	<b>12</b>
Pozemní	12
Vodní	19
Obojživelné	20
<b>KONSTRUKCE PODVOZKU</b>	<b>21</b>
Pružinový	21
Teleskopický	23
Pákový	24
<b>ZATÍŽENÍ PODVOZKU</b>	<b>25</b>
Statická stabilita	25
Dynamická stabilita	25
<b>ŘÍZENÍ PODVOZKU</b>	<b>25</b>
Aerodynamické	26
Ovládání kol podvozku	26
<b>TLUMENÍ PODVOZKU</b>	<b>26</b>
Netlumené podvozky	26
Tlumené podvozky	27
Tlumiče	27
Hydropneumatický tlumič	28
<b>BRZDĚNÍ PODVOZKU</b>	<b>29</b>
<b>DRUHY BRZD</b>	<b>30</b>
Protismyková zařízení	33
<b>ZATAHOVÁNÍ PODVOZKU</b>	<b>33</b>
Systémy zatahování podvozku	34



<b>PNEUMATIKY</b>	<b>34</b>
<b>Zatížení pneumatiky</b>	<b>35</b>
<b>Konstrukce pneumatiky</b>	<b>36</b>
<b>TORZNĚ – OHYBOVÉ KMITÁNÍ PODVOZKOVÝCH NOH – SHIMMY</b>	<b>37</b>
<b>Vznik shimmy</b>	<b>38</b>
<b>ZÁVĚR</b>	<b>39</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>40</b>

# Úvod, historický vývoj

Podvozek je součástí letadel umožňující jejich bezpečné pojíždění na zemi, vzlet a po samotném letu bezpečný návrat zpět na zemi. Je to jeden z nejdůležitějších elementů letadla jako celku a v případě nedostatečného konstrukčního provedení může mít katastrofální důsledky.

Už od počátku letectví bylo potřeba vyřešit problém přistávání letadla pro bezpečný návrat pilota zpět na zemi a znovupoužití stroje pro další lety. Zprvu se jednalo o jednoduché ližiny, které nebyly kvůli značným třecím silám a tehdejším slabým motorům příliš vhodné. Jednalo se ale o nejjednodušší možné řešení a také zřejmě nejlehčí, které nezatěžovalo subtilní konstrukci.

Před první světovou válkou nastal prudký rozvoj letectví, který vedl ke zvýšení výkonů motorů a vyšším nárokům letounů jako bojového prostředku. Bylo třeba jednodušší manévrovatelnosti na zemi, které bylo dosaženo pomocí kolového podvozku s ostruhou. Tento typ podvozku byl společný pro takřka každý typ letounů před a po první světové válce.

S rostoucí hrozbou dalšího válečného konfliktu byly vyvíjeny nové koncepce letadel, přičemž některé z nich byly slepou vývojovou větví, ale dobře posloužily jako experimentální laboratoře. Přibližně na začátku 30. let minulého století se objevují nové koncepce s příďovými podvozky, které oproti podvozkům s ostruhovým kolem poskytují mnoho výhod.

Svět letadel po válce je ve znamení prudkého rozvoje civilní letecké dopravy a s tím i požadavky na rychlé, velké a hlavně spolehlivé letouny. S většími rozměry letadel souvisí vyšší hmotnost a s ní i vyšší nároky na konstrukci podvozku. Byla překonána rychlost zvuku a ta by nebyla možná bez podvozku zatahovacího. Velká pozornost je věnována také vývoji pneumatik, brzd a tlumičů, bez kterých by i sebelepší koncepce neznamenal schopnost bezpečného přistání a zastavení bez nějakých trvalejších následků.

Dnes by se mohlo zdát, že v tomto odvětví není co vyvíjet, ale jak je vidět např. na novém obřím Airbusu A380, bylo i tam nutno použít nové, inovativní postupy a technologie. V budoucnu lze alespoň ve vojenském letectví předpokládat, že podvozky budou muset snášet vyšší přistávací rychlosti a být stále kompaktnější. V civilním letectví bude důležité postupné zvyšování bezpečnosti na úkor technologické jednoduchosti a snižování hmotnosti.

## Požadavky kladené na podvozek:

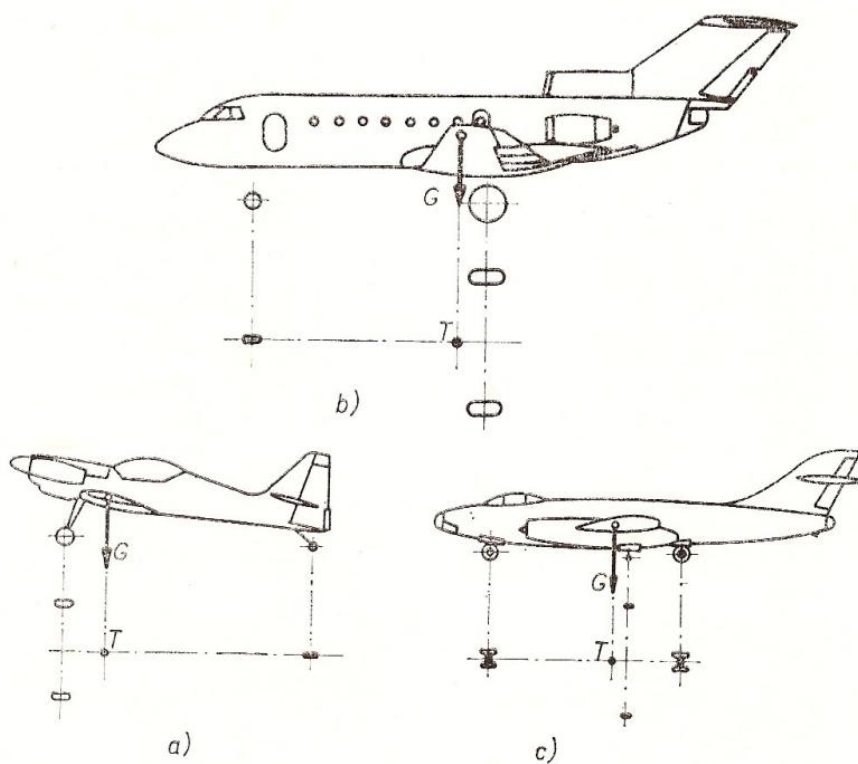
Hlavní úlohou podvozku je zamezení kontaktu ostatních částí letounu se zemí. Je ho nutno navrhnout s uvážením tzv. klopivých momentů. Kvůli těmto momentům musí být jedna část podvozku blízko těžiště letounu a stává se hlavním prvkem přenosu zatížení. Toto je nutné především při přistání, u kterého hrozí riziko překlopení a kontaktu nechtěné části letounu (např. vrtule) se zemí. Samotná koncepce přistávacího zařízení se pak také odvíjí od provozních podmínek a požadavků letounu. Mezi specifika provozního prostředí můžeme počítat např. terén, ve kterém se bude letadlo pohybovat. Podvozek letadla musí splňovat tyto požadavky:[4]

- dostatečná stabilita při pohybu na zemi při všech známých a neznámých silových zatíženích (např. boční poryv větru)
- požadavek na nízký aerodynamický odpor. Dosahuje se zakrytváním podvozku s co nejmenším odporem vzduchu nebo zatahováním podvozku do konstrukce letounu
- při maximálním stlačení tlumičů nesmí vzpěr v nohách letounu překročit povolenou hodnotu
- zajištění pohlcení třecí energie při brzdění
- zachování stálého rozchodu podvozku při dosednutí letadla na zem
- při maximálním stlačení tlumičů musí být zajištěna bezpečná vzdálenost mezi vrtulí a ocasní částí letadla od země
- jednoduchost a spolehlivost konstrukce, snadná údržba
- časový limit zatahování podvozku je u malých letadel 8-12 sekund, u velkých 15-20 sekund
- podvozek musí mít záložní systém pro jeho vysunutí
- zatahovací podvozek musí být v zatažené poloze těsně uzavřen
- u bojových letadel nesmí ohrozit bezproblémové odhození bomb a jiného nákladu

# Rozdělení podle druhu prostředí

## Pozemní

Drtivá většina letadel využívá ke startu a přistání VPD, pro kterou je nejvýhodnější kolový podvozek. Pro přistání do sněhu se používají lyže, které ovšem skýtají mnohá úskalí, která s kolovým podvozkem nenastanou (např. při pojíždění na zemi nelze letadlo snadno zastavit). Rozpoznáváme několik uspořádání podvozku vzhledem k poloze těžiště letadla a hlavního podvozku.

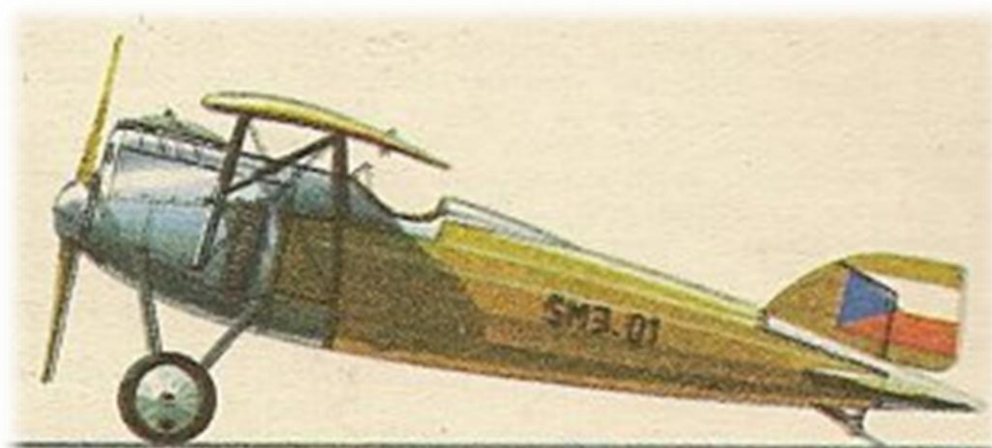


*Rozdělení jednotlivých druhů podvozků*

*a) ostruhový b) s předovým kolem c) tandemový podvozek [4]*

## Podvozek s ostruhou

Tento typ podvozku patří mezi historicky nejstarší a nejjednodušší. Objevoval se u vůbec prvních letadel a skýtal řadu omezení. Jeden z největších je např. obtížná řiditelnost na zemi, která vyžadovala asistenci pozemního personálu. Těžiště letounu se u tohoto uspořádání nachází za hlavním podvozkem.



*Letov Š-3 s pevnou ostruhou*

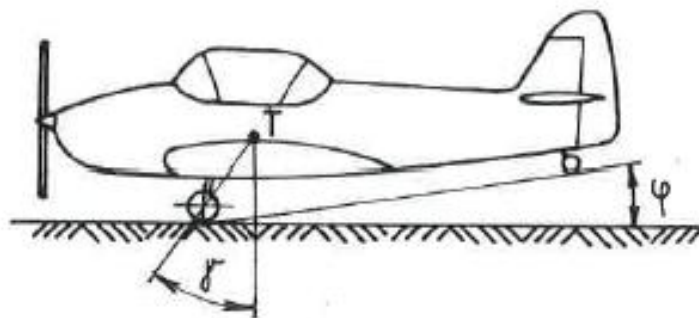
## Podvozek s ostruhovým kolem

Toto uspořádání je evolucí podvozku předcházejícího, které nahrazuje pevnou ostruhu natáčejícím řiditelným kolem. Je to nejtypičtější uspořádání dnešních menších a lehčích letounů, u kterých se těžiště nachází za hlavními nosnými plochami a letadlo je tak „zakloněno“ dozadu. Řízení při pojíždění je realizováno řiditelným otočným ostruhovým kolečkem. Rozchod hlavního podvozku musí být zvolen tak, aby byla zajištěna jeho stabilita. Jeho obvyklá hodnota se pohybuje mezi 20-30 % délky letounu. Rozvor letounu se naopak volí vzhledem k jeho hmotnosti tak, aby nebylo překročeno kritické zatížení ostruhy. Obvykle se tato hodnota pohybuje mezi 6-13 % jeho hmotnosti. Nevýhodou tohoto uspořádání je zhoršený výhled dopředu, dále pak při startu potřeba delší dráhy oproti uspořádání s příďovým podvozkem z důvodu vyššího odporu způsobeném vyšším úhlem náběhu křídla, které má snahu generovat vztlak už od počátku rozjíždění letadla po dráze a tak prodlužuje dráhu vzletu. Konečně při přistání a následném brzdění lze stroj překlopit a může dojít ke kontaktu vrtule se zemí a její následné poničení spolu s dalšími díly motoru. Výhodami uspořádání jsou pak nižší hmotnost, menší odpor vzduchu a jednoduchost.



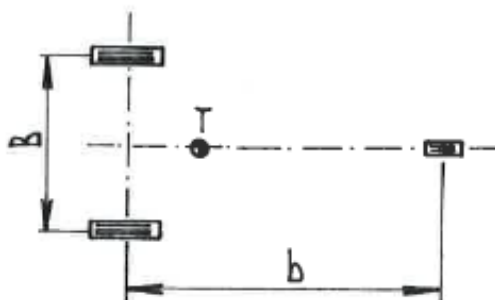
*Zlín Z-526 s ostruhovým kolem*

Těžiště u letadel s tímto uspořádáním by se mělo nacházet mezi  $5^\circ$  až  $25^\circ$  stupni od vertikální osy (úhel  $\gamma$ ) procházejícím středem kol hlavního podvozku. Zde je nutno najít kompromis mezi zatížením ostruhového kolečka a tím i nutností vyššího vztlaku během vzletu a klopným momentem při brzdění po přistání. Ostruhové kolečko by mělo být umístěno co nejvíce vzadu pro snížení jeho zatížení hmotností letadla. Zároveň ale musí být umístěno s ohledem na konstrukci letadla, aby například nedošlo ke kolizi se směrovým kormidlem. Jeho kloubové uchycení by mělo s povrchem VPD svírat úhel  $\phi$  kolem  $5^\circ$ . Pro vrtulová letadla platí, že při maximálním stlačení podvozku musí být mezera mezi zemí a koncem listu vrtule větší než 250 mm. U letadel proudových toto samozřejmě neplatí a podvozek může být o málo kompaktnější.



*Znázornění úhlů [3]*

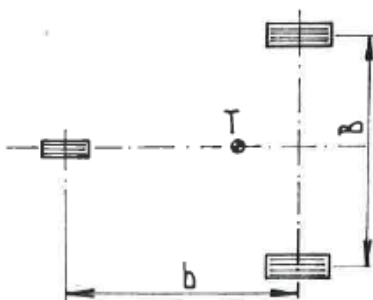
Nejčastěji se používají pružinové ostruhové kolečka pro svou jednoduchost, nízkou hmotnost a dostupnost. Teleskopické, pákové a závěsné se používají u těžších druhů podvozků.



*Schéma uspořádání s ostruhovým kolem [3]*

### **Podvozek s předovým kolem**

Uspořádání typické pro moderní a velké dopravní letouny, které potřebují především bezpečný výhled vpřed a řiditelnost při pojíždění po dráze. Těžiště se u druhu podvozku nachází před hlavním podvozkem. Výhodou tohoto uspořádání je, že mimo jiné také usnadňuje nakládání a vykládání letadla spolu s větším komfortem pro posádku a cestující, kteří i při čekání na vzlet na zemi sedí v přirozené vodorovné pozici. Dalším pozitivem je rychlejší nabírání minimální vzletové rychlosti, protože křídlo je v pozici nízkého úhlu náběhu a snižuje tím tvorbu nechtěného vztlaku, jenž prodlužuje potřebnou délku VPD pro zrychlení na minimální vzletovou rychlost. Po dosažení této rychlosti pilot přitáhne knipl a potřebný vztlak lze rychle generovat a bezpečně vzlétnout. Výhodou je také možnost intenzivnějšího brzdění než s podvozkem záďovým, protože nehrozí překlopení letadla dopředu na přední část letounu. V dnešní době je tento podvozek preferován právě pro výše zmíněné výhody. Nevýhodou je oproti podvozku s ostruhovým kolem složitější mechanismus zatáčení a náchylnost k shimmy. Nezanedbatelná je i hmotnost tohoto řešení.



*Schéma předového podvozku [3]*





*ATEC 321 a příklad předového podvozku*

Zatížení tohoto podvozku by se mělo pohybovat okolo 10-20 % hmotnost letadla a to kvůli jeho ovládání, které by bylo mimo tyto hodnoty zatížení neadekvátně silově náročné nebo naopak by přední kolo nebylo dostatečně zatíženo a neposkytovalo dostatečnou trakci.

Noha předového podvozku je většinou pevně připevněna k uložení motoru nebo k motorové přepážce mezi motorem a kabinou. V některých případech jsou připevněny rovnou ke konstrukci trupu.

Vzhledem k tomu, že se noha předového podvozku nachází hned za vrtulí a jejím vírem, je odpor pouze této přední nohy téměř roven odporu noh hlavního podvozku. Za účelem tento odpor co nejvíce eliminovat, se lze setkat s koncepcí zatahování pouze této přední nohy (př. Messerschmitt-Bölkow BO 209).





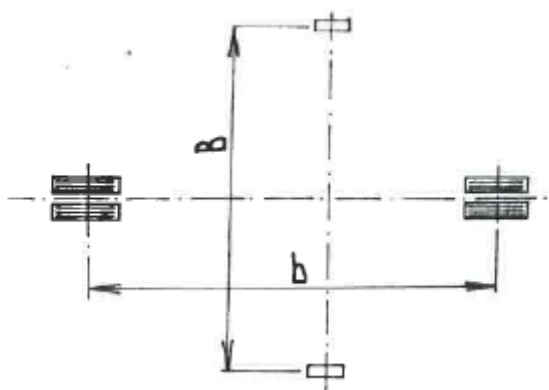
*Bo-209 se zataženým předovým kolem*

## Podvozek tandemový

Tandemový podvozek je typický především pro vojenské letouny (např. americký B-52 a britský Harrier). Tento typ podvozku je používán velmi zřídka a to u letounů, jejichž koncepce nedovoluje použití klasického předového nebo zadového uspořádání. U Hawker Harrier je to kvůli natáčecí výtakovým tryskám umožňujícím mu jeho typické vznášení se na místě. Při kolmém vzletu nebo přistání by žhavé výfukové plyny spálily pneumatiky, proto bylo přistoupeno k tomuto uspořádání se stabilizačními nohami na koncích křídel. U velmi těžkých letadel, jako je B-52 nebo An-124 byl tento druh podvozku zvolen pro svou schopnost rozložit toto velké zatížení na větší plochu a na jednotlivé podvozkové nohy. Dalším důvodem použití tohoto podvozku je nutnost umístit náklad do těžiště letounu, a proto bylo nutno použít hornoplošné uspořádání křídla.



*An-124 Ruslan a jeho tandemový podvozek*



*Schéma tandemového uspořádání [3]*

## Vodní

Pro přistání na vodě se používají plováky buď z kovu, nebo z pryže (vrtulníky), samozřejmě vodotěsné, umožňující bezpečné plování po hladině vody [7]. Přistání a vzlet jsou ale limitovány počasím, potažmo stavem vodní hladiny. Plováky představují v letu velkou zátěž, a navíc představují velký čelní odpor snižující rychlost letounu, proto se tento druh podvozku používá pouze u specifických letounů. Plováky jsou uvnitř rozděleny na minimálně 4 části přepážkami přibližně stejného objemu, přičemž po zaplavení jakýchkoliv dvou oddělení vodou, musí zbytek poničeného plováku unést letadlo na hladině.[1]



*Hydroplán s plováky po vytažení na vozíku na břeh*

## Obojživelné

Kombinace předchozího plovákového podvozku s kolovým podvozkem, kdy se kola vysunují při najíždění na rampu přístaviště z vody. Mezi důležité požadavky patří těsnost celého systému proti proniknutí vody. Tyto podvozky jsou využívány u hasících letadel, které jsou schopny při letu s letným kontaktem s hladinou vody nabrat obrovské množství hasící kapaliny za minimum času. Zajímavostí této koncepce je, že samotný trup generuje nezanedbatelný vztlak pomáhající letadlu v letu.



*Létající člun PBY-5 Catalina s vysunutým podvozkem při pojíždění na zemi*

# Konstrukce podvozku

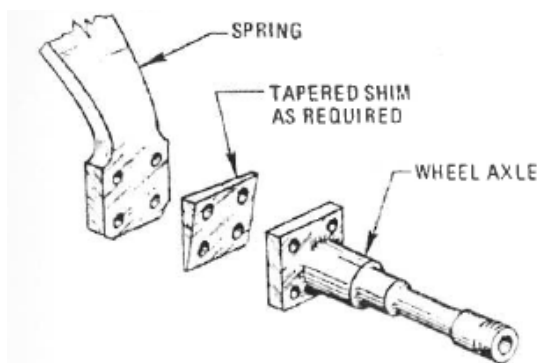
Při rozhodování o druhu koncepce podvozku, je třeba dbát na několik důležitých faktorů. Nejdůležitější z nich jsou velikost a hmotnost letounu. Je jasné, že velký a těžký letoun bude mít vyšší kinetickou energii a podvozek musí být schopen tuto energii utlumit a letoun bezpečně zastavit. Neméně důležitými faktory při navrhování podvozku jsou provozní podmínky letounu, kdy je třeba uvažovat, jestli letoun bude operovat např. ze zpevněné nebo nezpevněné vzletové a přistávací dráhy. Tyto a další faktory určují použití jednoho ze tří nejčastěji používaných konstrukčních uspořádání a ty jsou:

## Pružinový

Konstrukčně nejjednodušší typ podvozku, je nezatahovatelný, vhodný zejména pro malá a lehká letadla. Hlavním nosným prvkem je zde nosník (pružina), který je na jedné straně připevněn ke spodu nebo boku trupu a na druhé straně ke kolu. Druhou variantou je pouze jeden nosník, který je ve své střední části připevněn k trupu a na obou jeho koncích jsou kola. V obou případech jsou nosníky ke konstrukci letadla připevněny pomocí šroubů.

Pružinový nosník svým pružením přeměňuje deformace v průběhu vzletu, přistání a pojíždění na tepelnou energii, která volně uniká do okolního prostředí. Této energie je ovšem velmi málo a její velkou část nosníky vrátí v podobě odpružení letadla zpět vzhůru. Část energie disipuje také jako teplo vzniklé třením mezi pneumatikami a VPD. Pružinové nosníky bývají nejčastěji vyráběny hlavně z ocelí nebo kompozitních materiálů, přičemž se musí při návrhu tohoto druhu podvozku věnovat pozornost především únavovým charakteristikám jednotlivých materiálů. Jako několikanásobně vhodnější materiály pro použití nosníků se jeví kompozity.

Při návrhu je doporučeno uvažovat výchozí pozici při statickém zatížení tak, aby osa kola byla v pozici rovnoběžné s VPD. Toho lze dosáhnout pomocí na míru upravovaných podložkám, které se pomocí šroubů upevňují mezi pružinový nosník a poloosou kola. [1]

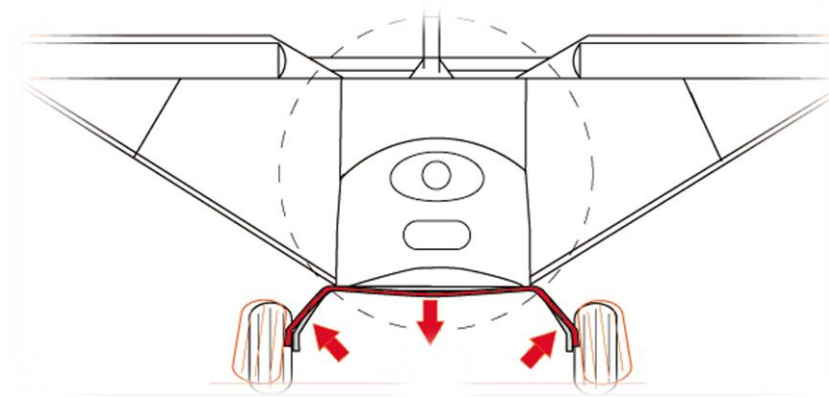


*Pružinový nosník, osa kola a vložka mezi nimi [1]*



Pro lineární nárůst ohybového momentu po celé délce nosníku je nutno vypočítat jeho zúžení.

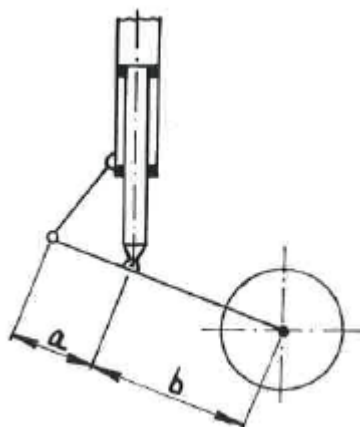
Tato koncepce podvozku je vhodná především pro malá, relativně nevýkonná letadla, pro která je tato technická jednoduchost velmi dobře využitelná.



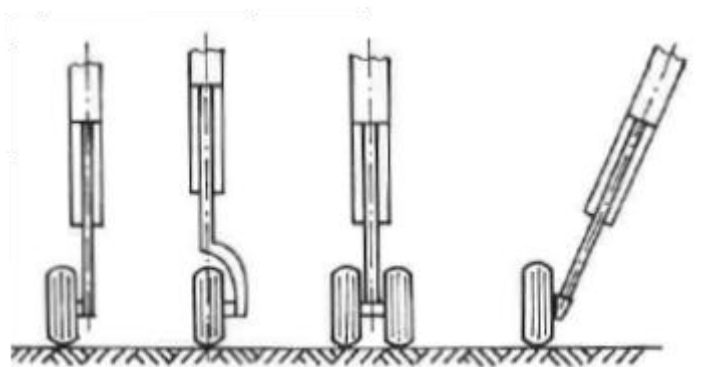
*Schéma pružinového podvozku [10]*

## Teleskopický

Rozdíl mezi podvozkem teleskopickým a pákovým je v umístění tlumiče. Tlumič u tohoto druhu podvozku je umístěn rovnou v podvozkové noze. Z toho vyplývají jisté výhody v podobě jednoduchosti, kompaktnosti a snížené hmotnosti spolu s nižším čelním odporem. Při zatížení se tlumič posune dovnitř nohy a dovolí tak bezpečné přistání bez nebezpečného rázu. Nevýhodou tohoto druhu uspořádání je omezení délky tlumiče délkou nohy podvozku, a proto musí být tlumič u kratších podvozků tužší. Další nedokonalostí této koncepce je slabé tlumení vodorovných sil a větší tření v manžetách, které snižuje jejich životnost, a proto i spolehlivost podvozku trpícím netěsnostmi. Pro měkčí nastavení tlumičů je na druhou stranu potřeba zvýšit stavební výšku nohy. To má za následek nižší komfort cestujících, ale i snížení životnosti těsnících manžet tlumičů. Problém s tuhostí a tvrdostí tlumičů lze odstranit použitím kola uchyceným na páce. Tímto způsobem lze při malém zdvihu tlumiče dosáhnout relativně velký zdvih kola. Toto řešení je ovšem prostorově náročnější, což může být na obtíž u zatahovacího podvozku, u kterého bude nutné s tímto omezením u návrhu podvozkové šachty počítat.



*Ilustrace teleskopického podvozku[3]*

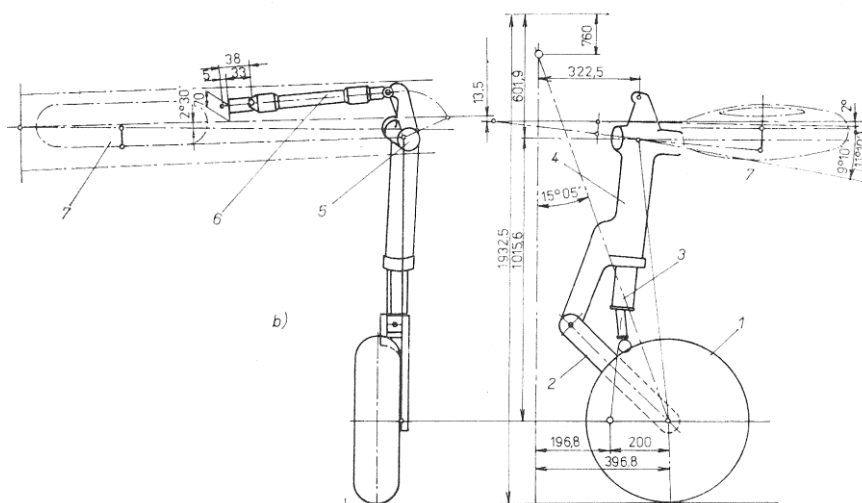


*Varianty použití tel. podvozku [3]*

## Pákový

Hlavní rozdíl oproti teleskopickému podvozku je v umístění tlumiče vně podvozkové nohy, a proto přenáší pouze osově síly. Kolo je umístěno na kyvné páce. U těžkých letadel je ale třeba použít vozíku, na kterém jsou připevněny kola podvozku (2 a více kol), které rozloží zatížení od letounu na větší plochu, a proto je možno použít kola menších průměrů než jedno velké. Mezi hlavní výhody pákových podvozku patří velký zdvih při malé výšce podvozku a životnost podvozku (boční síly se přenášejí přes páku a těleso podvozku, tlumič je namáhán pouze osově díky uchycení tlumiče mezi pákou a tělesem úchyty vzájemně pootočenými o  $90^\circ$  nebo úchytem kardanovým kloubem na páce). Vyšší hmotnost a prostorově výraznější řešení vyžadující větší prostor v křídle patří mezi nevýhody.

U zatahovacích podvozků se používá jako vzpěra pístnice tlumiče, která je zajištěna v krajních polohách hydraulickými nebo mechanickými zámky.



*Ilustrace pákového podvozku [1]*



# Zatížení podvozku

## Statická stabilita

Abychom mohli říci, že podvozek letounu je staticky stabilní, musí splnit určitá kritéria, jako je schopnost udržení kola ve směru podélné osy letounu při stání a při pomalém pojíždění. Pro splnění těchto kritérií musí mít správný tvar podvozkové nohy.

Nestabilní případ nastane, jestliže je osa skloněna směrem dozadu a tíhová síla letounu se snaží kolo natočit do statické rovnováhy a otočit kolo o  $180^\circ$ .

Opačný, stabilní případ je s podvozkovou nohou skloněnou dopředu, přičemž při zatáčení (vychýlení) kola se těžiště letounu nadzvedává. V případě ukončení působení boční síly se kolo uvede zpět do původního přímého směru.

Staticky indiferentní poloha nastává, když je osa otáčení kolmá na kolo podvozku.

## Dynamická stabilita

Dynamická stabilita se projeví při vysokých rychlostech pohybu letounu po zemi. Kritické okamžiky pro dynamickou stabilitu jsou pak zejména vzlet a přistání. Na tuto stabilitu má vliv zejména velikost a smysl stopy, tedy vzdálenost mezi průsečíkem osy otáčení podvozkové nohy a bodem dotyku kola se zemí. V případě, že osa otáčení protíná zemi před bodem dotyku kola, to se při vybočení velmi rychle vrací do přímého směru a tento podvozek je dynamicky stabilní. Osa otáčení u dynamicky nestabilního podvozku protíná zemi až za bodem dotyku pneumatiky se zemí, a proto má snahu při najetí na nerovnost a jeho vybočení kmitat. Indiferentní podvozek má osu otáčení protínající zemi ve stejném bodě, jako je bod dotyku gumy se zemí.

## Řízení podvozku

Existuje několik způsobů směrového ovládní podvozku při pohybu letounu. Samotné technické provedení ovládní se dá rozdělit na dvě hlavní skupiny. Aerodynamické řízení pomocí proudu vzduchu a mechanické ovládní podvozkových kol, které je samozřejmě mnohem účinnější než ovládní pouze pomocí vzduchu.

Z praktického hlediska má pilot možnost ovládat podvozek nožním řízením bez pomoci posilovače, ale pouze u lehkých strojů, které nevyžadují velkou sílu k natočení předního kola. Tento systém je spojen s ovládním směrovky a u některých letounů se toto nožní řízení odpojí při zatažení podvozku, aby nedocházelo k otáčení kol v podvozkové šachtě. Natočení kola do přímého směru dochází buď díky automatického systému, nebo na podnět pilota.

## Aerodynamické

Aerodynamické ovládání se provádí pomocí směrového kormidla. Toto je typické pro ovládání hydroplánu při pohybu na vodní hladině. U vrtulových letadel je tento efekt umocněn proudem vzduchu od vrtule. Nevýhodou tohoto druhu řízení je ve větším poloměru zatáčky, kterou letadlo musí vykonat a také v nemožnosti letadlo okamžitě zabrzdit na místě.

## Ovládání kol podvozku

Toto ovládání se dá nejčastěji rozdělit na ovládání příďového nebo ostruhového kola. Také se v praxi používá diferenciální přibrzdování jednotlivých kol hlavního podvozku. Natáčení příďového kola se vykonává buď skrze elektrické motory, nebo častěji skrze hydraulické systémy. Tento systém má v sobě zahrnut také anti-shimmy tlumiče, které ono samotné řízení zajišťují a takovéto použití hydraulických tlumičů, ačkoli těžších, větších a složitějších tuto koncepci dělá velmi efektivním použitím u velkých letadel.

## Tlumení podvozku

Tlumení podvozku je z konstrukčního hlediska jedna z nejdůležitějších věcí, které musí konstruktér vyřešit. V případě nedokonalého zvládnutí této části návrhu podvozku nastávají velmi vážné problémy začínající od nepohodlí posádky až po přímé ohrožení její bezpečnosti.

## Netlumené podvozky

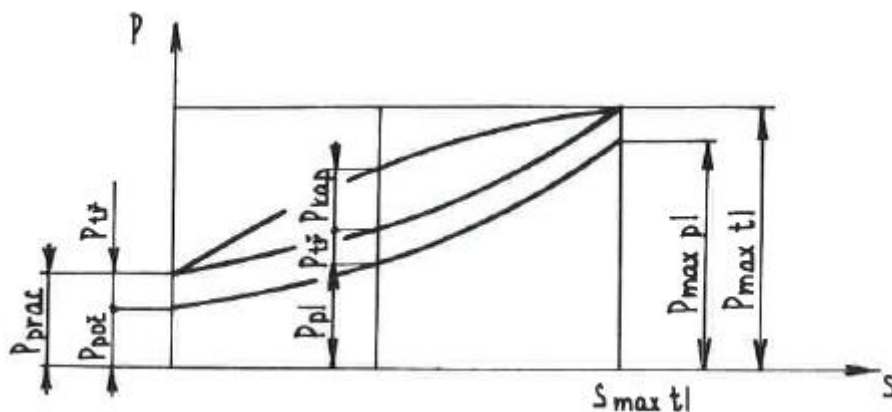
Nejjednodušší uspořádání používané u ultralehkých letadel a kluzáků. Hlavními tlumícími prvky jsou zde pneumatiky. Tyto podvozky jsou většinou lehké díky absenci tlumičů, na druhou stranu je tato úspora hmotnosti vykoupena hmotností výztuh podvozkových noh.

Letadla s těmito podvozky jsou omezena hlavně na VPD s travnatým povrchem kvůli možnému poškození podvozkových noh. Další nevýhodou je zatížení posádky letounu vibracemi, rozšiřující se až na potenciální narušení pevnosti struktury stroje při nesprávném natlakování pneumatik. Pružný materiál noh hlavního podvozku přemění menší část dopadové kinetické energie v odpadní teplo, velká část energie se přemění do tření mezi gumovými koly a VPD. To znamená, že tento podvozek v případě častějšího použití na tvrdých VPD bude náročnější na obměnu pneumatik, zatímco při použití na travnatých plochách bude tření mezi VPD a pneumatikami mnohem menší. Výhodou tohoto druhu podvozku je relativní jednoduchost, lehkost a

nízká cena. Nevýhodou naopak je potenciální odskakování letadla při přistání od dráhy a tím pádem i delší brzdná dráha.

## Tlumené podvozky

Používané u větších a těžších letadel, u kterých není minimální hmotnost a cena těmi hlavními předpoklady. Používají tlumiče zabudované do noh podvozku umožňující vyšší bezpečnost posádky, kratší brzdnu dráhu a komfort. Také se přenášejí menší rázy do draku letadla, který je jimi méně namáhán a zvyšuje se tím jeho životnost. Nevýhodou je vyšší hmotnost, nutnost podvozek udržívat (např. kontrolovat těsnost tlumičů) a vyšší cena vycházející ze složitosti. Výhody ale obecně převyšují nevýhody.



Pracovní diagram tlumiče závislosti tlaku  $p$  na zdvihu  $s$  [3]

## Tlumiče

Tlumiče mají za úkol pohltit energii vznikající při přistání nebo poježdění letounu a ztlumit veškeré vibrace, které by ho mohly nějakým způsobem poškodit. V minulosti se místo tlumičů používala jednoduchá pera, která ovšem nemají dobré tlumicí vlastnosti. Při přistání přemění poměrně malou část energie do tepla a většinu ji vrátí zpět do odpružení letadla.

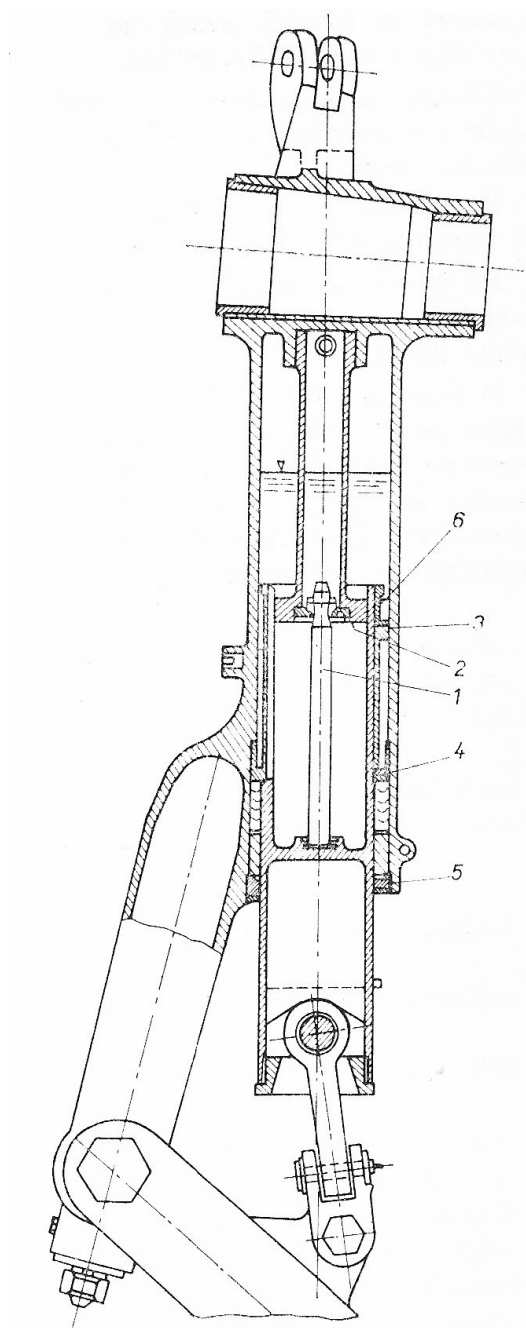
Pro lehká letadla se používají tlumiče pryžové, které na molekulární úrovni mění dodanou kinetickou energii v teplo.

V dnešní době jsou nejdokonalejšími tlumiči kapalinové, jejichž princip spočívá v protlačování téměř nestlačitelné kapaliny malými otvory.

Tlumiče fungují v obou pracovních režimech. Při kompresním a při expanzním zdvihu.

## Hydropneumatický tlumič

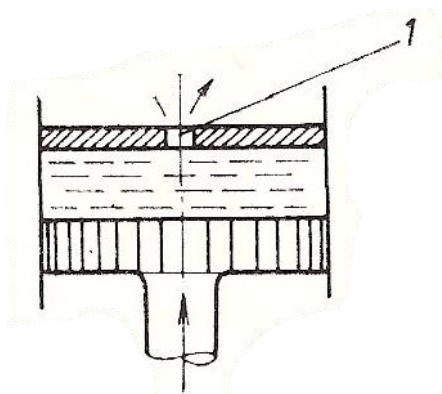
Hydropneumatický tlumič si můžeme představit jako dvě různě velké souosé válcové nádoby, přičemž vnitřní má v sobě řadu malých otvorů, skrz které při stlačení proudí kapalina do většího pístu, ve kterém se stlačuje plyn a po odlehčení tlačí kapalinu zpět do válce menšího. Pro větší účinnost tlumiče se používá předpětí plynu v tlumiči, kdy je plyn již předem stlačen na požadovanou úroveň.



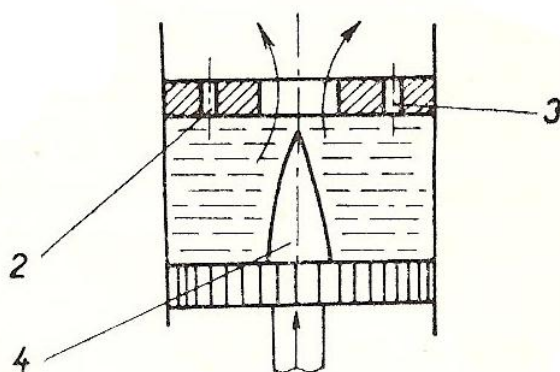
*Schéma hydropneumatického tlumiče*

*1-trn, 2-průtočný otvor, 3,4,5,6-těsnění [4]*

Průtočné otvory tlumičů bývají buď pevné anebo proměnlivé. Těchto proměnlivých otvorů se často dosahuje pomocí trnu s proměnným průměrem. Zatímco u průtočného otvoru daného pevnou geometrií je charakteristika tlumení konstantní, u tlumičů s proměnlivými průtočnými otvory se tato charakteristika mění dle geometrie trnu a zdvihu pístu.



*Tlumič s konstantním průtočným otvorem (1)*



*Tlumič s proměnným průtočným otvorem a s kuželovým trnem  
otvory stálého průtoku (2,3), trn (4) [4]*

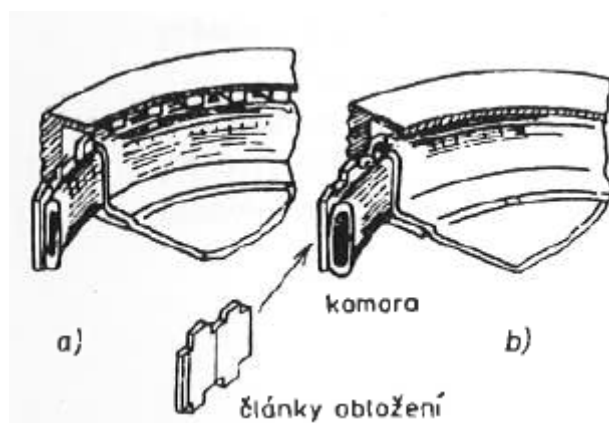
## Brzdění podvozku

V dnešní době je drtivá většina letadel vybavena brzděným podvozkem, snad pouze některá amatérská letadla tuto výbavu nemají. U menších produkčních typů jsou brzděná především kola hlavního podvozku, u velkých letadel jsou to kola všechna. Některá letadla disponují reverzační tahy, která zatížení brzd podvozku při brzdění značně snižuje. Existuje několik možností brzdění kol:

# Druhy brzd

## Komorové brzdy

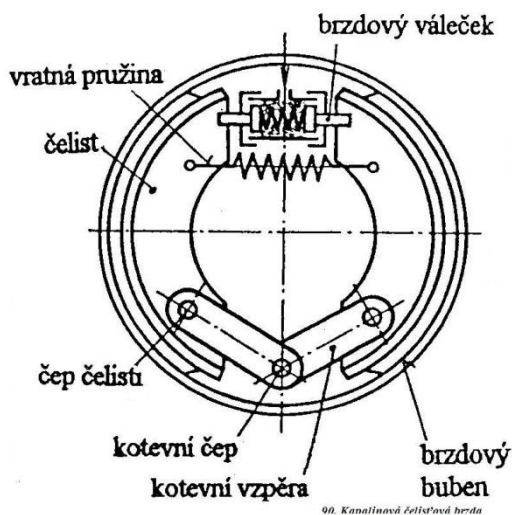
Komorová brzda se skládá z bubnu pevně spojeného s otáčejícím se kolem a z komory s obložením na pevné části podvozkové nohy. Při brzdění se pryžová komora, kterou si lze představit jako duši naplněnou plynem, nebo kapalinou a ta přitiskne brzdové obložení na bubnu. Dochází k tření mezi pevnou a pohyblivou částí, zpomalování letounu, ale i k velkému vývinu tepla, které klade požadavky na chlazení bubnu např. žebrováním. Při povolení tlaku je obložení pružnými pery vráceno do původní polohy.



*Detail komorové brzdy [4]*

## Čelistové brzdy

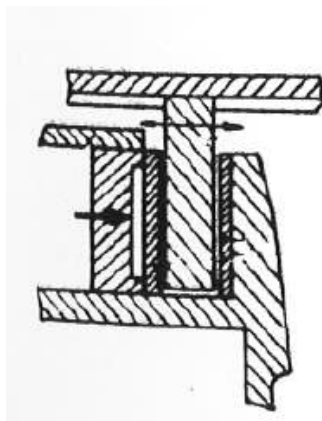
Jsou velice podobné bubnovým brzdám u automobilů, kdy roztáhnutím pevně uchycených čelistí v kontaktu s rotujícím bubnem dochází k tření a samotnému brzdění. Opět je tady hrozba spálení brzd v důsledku intenzivního brzdění.



*Schéma čelistové brzdy [7]*

## Kotoučové brzdy

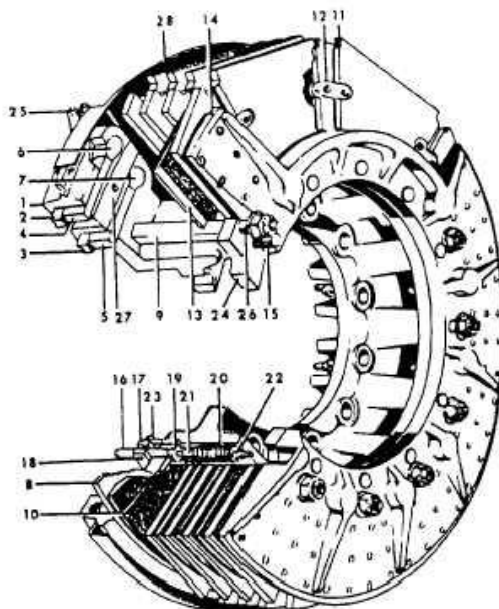
Taktéž obdoba u automobilů, i když poprvé se tento typ brzd použil právě u letadel. Principem fungování je přitlačení čelistí s obložení na rotující disk brzdy. Tlak je způsoben pomocí jednoho či více hydraulických pístů. Problémem tohoto řešení je téměř nutnost posilovače brzd pro dostatečný tlak v pístech. V dnešní době se používají keramické disky, které umožňují intenzivnější brzdění bez deformací způsobeným vyvinutým teplem. Chlazení se u těchto brzd aplikuje děrováním kotouče poskytující spolu s otevřeným brzdovým systémem dobrý chladicí účinek kotoučů.



*Detail kotoučové brzdy [4]*

## Lamelové brzdy

Jedná se o spojení několika kotoučů vedle sebe. Toto uspořádání má značný brzdný účinek, ale i prostorovou náročnost, proto se používají u velkých a těžkých letadel. Nevýhodou je vysoký výkon tepla v relativně malém objemu, kdy při intenzivním brzdění může dojít k zvlnění brzdného disku.



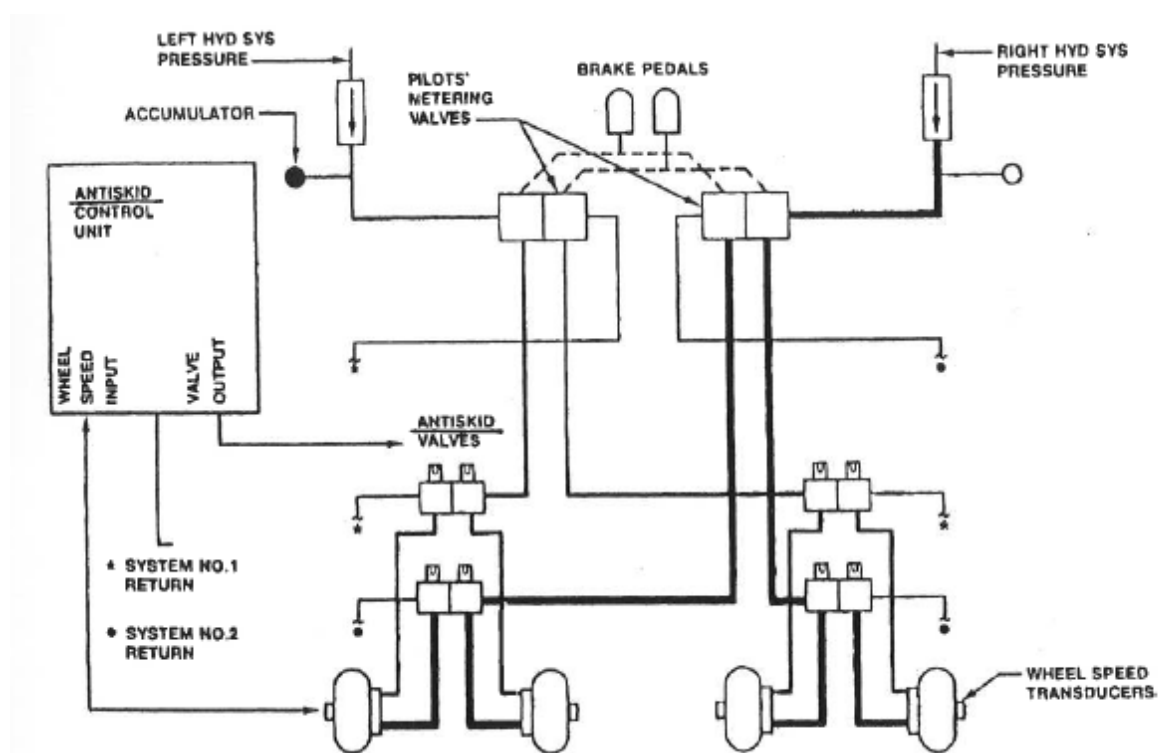
*Znázornění lamelové brzdy [1]*



## Protismyková zařízení

V moderních větších letadlech je posádce k dispozici protismykový systém, který zabraňuje zablokování kol při intenzivním brzdění a poškození pneumatik podvozku. Dalším negativem při zablokování kol je ztráta ovladatelnosti letadla stejně tak, jak se děje u automobilů.

Systém je řízen počítačem, který vyhodnocuje vstupní data, jako jsou otáčky nebrzděného kola, brzděného kola, požadovaný poměr odvalování a prokluzování kola.



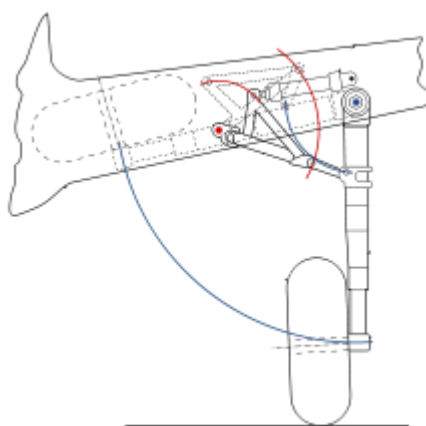
*Schéma protismykového systému [2]*

## Zatahování podvozku

U stále rychlejších letounů vznikajících okolo roku 1930 vznikla potřeba snížit čelní odpor letounu. Jednou z cest k dosažení tohoto cíle bylo podvozky k tomuto účelu upravit. Původně se jednalo o různé aerodynamické zakrytování kol (často používalo dodnes hlavně u menších sportovních letounů), až po snahu odpor podvozku eliminovat jeho zatahováním dovnitř trupu letounu. Mezi hlavní výhody patří již dříve zmíněný nižší čelní odpor, možnost pohybu vysokou rychlostí a nižší spotřeba paliva. U vojenských letounů se zatahováním podvozku dosahuje části radarové neviditelnosti STEALTH. Nevýhody jsou v technicky náročnější realizaci systému a snížení přepravního objemu, který by se dal použít i jako např. prostor pro palivo.

## Systémy zatahování podvozku

V době, kdy se začaly používat zatahovací podvozky s jednoduchým klikovým mechanismem, vyžadovaly od pilota velkou manuální sílu (např. Polikarpov I-16). Proto se často stávalo, že letouny létaly s vysunutým podvozkem. Nyní se používají buď elektrické, nebo hydraulické systémy (častější). Podvozek se zatahuje do prostoru nazývané podvozková šachta.



*Zatahovatelný teleskopický podvozek [8]*

## Pneumatiky

Pneumatika podvozku je jedna z jeho nejdůležitějších částí, protože plní několik úkolů najednou. Především se jedná o přenos zatížení mezi zemí a letounem samotným, dále snižuje odpor při pohybu letounu po zemi a pomáhá při brzdění letounu. Již menší, ale nezanedbatelný význam má při tlumení rázů při pojíždění nebo brzdění. Pneumatiky se dle základního rozdělení dělí dle tlaku, a to na:

vysokotlaké pneumatiky – tlak od 1,2 do 2 MPa

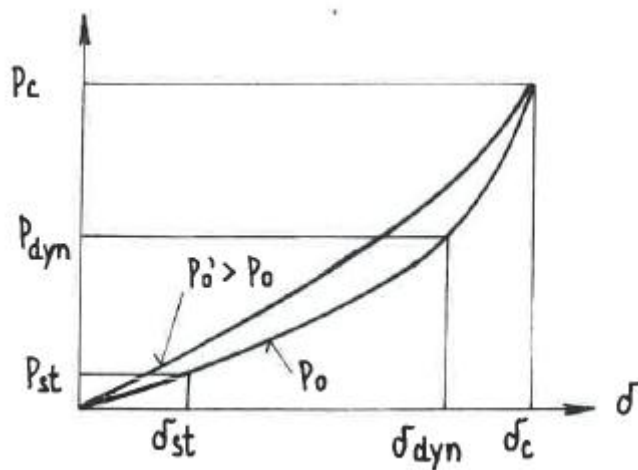
středotlaké pneumatiky – tlak od 0,6 do 1 MPa

nízkotlaké pneumatiky – tlak od 0,2 do 0,4 MPa

Další dělení je možné z hlediska konstrukčního a to na **dušové** a **bezdušové**. V moderních letadlech se používají téměř výhradně bezdušové pneumatiky, protože oproti svým protějškům mají řadu výhod jako např. nemožnost ustřížení ventilků, nižší zahřívání a jsou vhodnější pro použití při vyšších rychlostech.

## Zatížení pneumatiky

Z pracovního diagramu pneumatiky vyplývá, že energie pohlcená pneumatikou se nachází mezi křivkami.

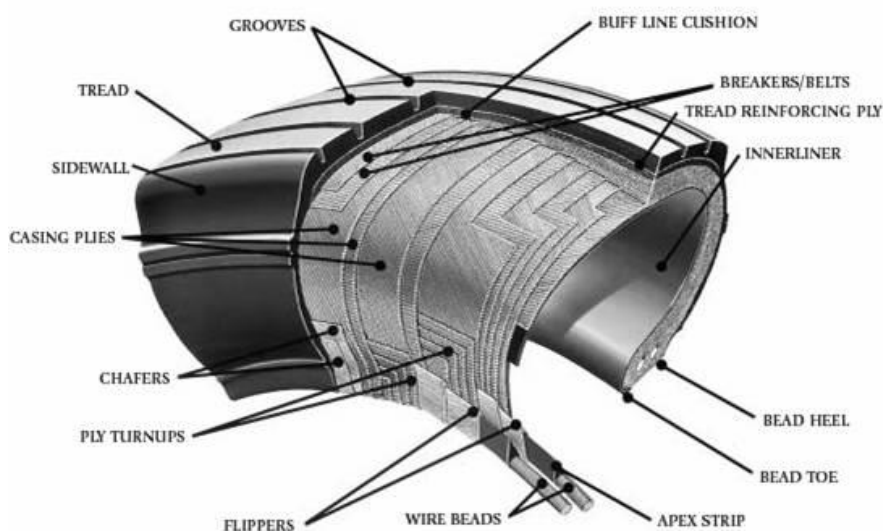


*Pracovní diagram pneumatiky závislosti tlaku  $p$  na stlačení  $\delta$  [3]*

## Konstrukce pneumatiky

Základním stavebním prvkem pneumatiky je tzv. kord, který přenáší veškeré zatížení, které na pneumatiku působí.

Na vnějším okraji se nalézá vulkanizovaná vrstva zvaná protektor. Může být se vzorkem i bez vzorku. Hlavní úlohou protektoru je odvádět vodu zespod kola. Tvar vzorku a výška jeho profilu hraje důležitou roli při jevu zvaném aquaplaning známého také z oblasti automobilů. Aquaplaning nastane v případě vysoké rychlosti, kdy se před kolem tvoří vlna vody a pneumatika ji nestačí ze spodu kola odvádět. Hydrostatická síla v kapalině nadzvedne celé kolo a letoun se stává neovladatelným až do chvíle, než se opět sníží hydrostatická síla na hodnotu, při které se kolo opět



setká s povrchem VPD. Toho lze dosáhnout jedině snížením rychlosti pohybu.

*Řez pneumatikou [1]*

Z důvodu minimalizování nebezpečí aquaplaningu je třeba, aby byl letadlům přistávajících při vysokých rychlostech navržen protektor a jeho vzorek pro co nejlepší odvádění vody.

## Torzňě – ohybové kmitání podvozkových noh – shimmy

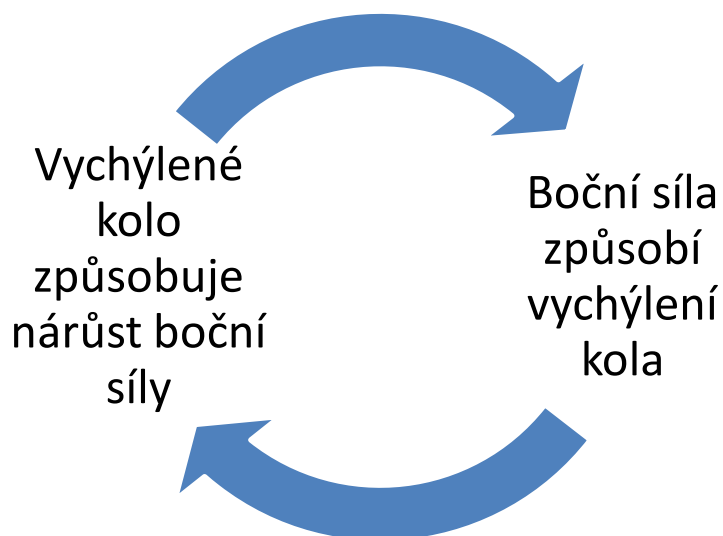
Při pohybu letounu po dráze vysokou rychlostí spolu s impulsem boční síly se má podvozek tendenci rozkmitat ve frekvenci obvykle 10-30 Hz a to až při vychýlení nohy o 90°. Tento jev se nazývá shimmy a v rámci zvýšení bezpečnosti a životnosti podvozku se konstruktéři musí tomuto jevu vyvarovat. Jeho původ je v interakci mezi samotnou konstrukcí podvozku a pneumatikou, proto když se shimmy vyskytne, je nutné okamžitě snížit dopřednou rychlost letadla.

Tomuto jevu se zamezuje dvěma speciálními anti-shimmy hydraulickými tlumiči (pístovými a lopatkovými), použitím pneumatik s dvojí stopou anebo zdvojeným předovým podvozkem. Tyto tlumiče mohou být také použity jako ovládací hydromotory předového podvozku. Dočasným prostředkem pro eliminaci tohoto jevu je snížení tlaku v pneumatikách, což má za následek zvýšení kontaktní plochy mezi gumou a VPD.

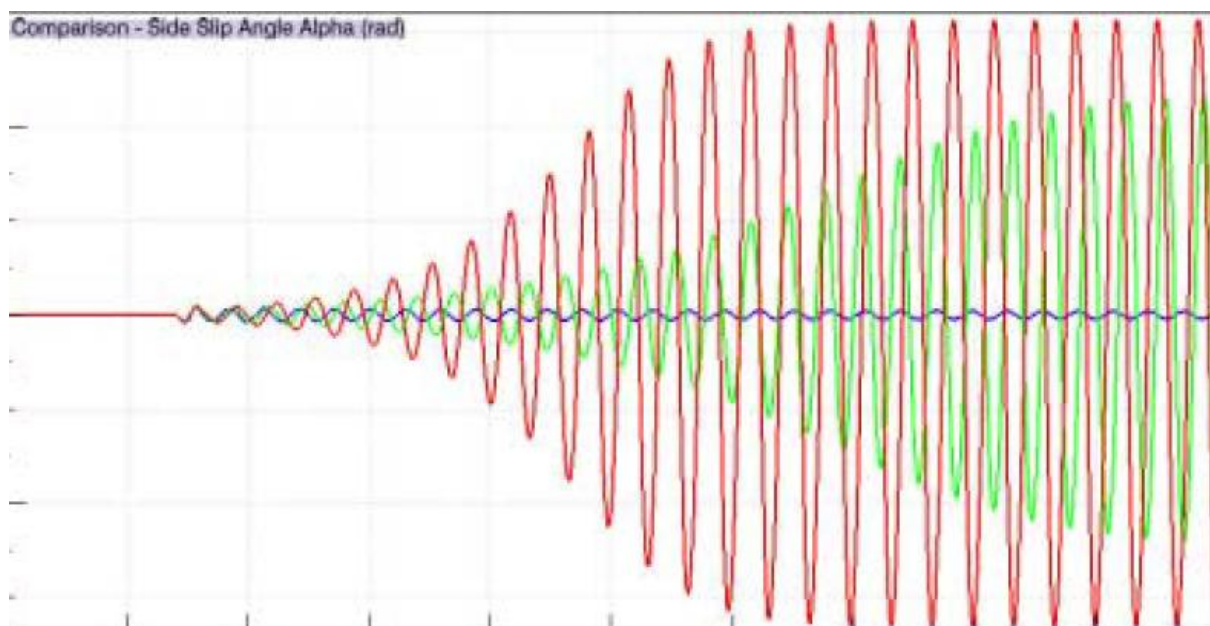


*Stopy pneumatik letadla po jevu shimmy*

## Vznik shimmy



Zabránění tohoto jevu můžeme ještě dosáhnout např. zvýšení tuhosti tlumiče, geometrie podvozku.



*Závislost vychýlení kola na čase. Tuhosti jsou: červená 4e5 Nm/rad, zelená 5e5 Nm/rad, modrá 6e5 Nm/rad [9]*



## Závěr

Spolu se silným rozvojem letecké dopravy po celém světě narůstají nároky na technicky dokonalejší letadla splňující stále náročnější bezpečnostní předpisy a ekonomické nároky. Výrobci letadel se musí neustále snažit přesvědčit zákazníky o tom, že jejich produkty jsou lepší než konkurence. V tomto konkurenčním boji hrají jednotlivé konstrukční celky letadla velmi důležitou roli a jednou z nich je i podvozek. Podle záměru použití letadla se určuje koncepce podvozku pro jeho bezproblémové a dostatečné používání.

Letecký průmysl je, vždy byl a dlouhou dobu bude lídrem ve vyvíjení nových technologií, umožňující mu výrobu nových, ještě rychlejších a bezpečnějších letadel. V minulosti se z leteckého průmyslu převzaly do jiných odvětví nejnovější technologie a tento princip funguje zpětně. Letecký průmysl vyžaduje vždy nasazení na nejvyšší úrovni jak od konstruktérů, tak např. od metalurgů, kteří připravují materiály té nejlepší, letecké kvality.

Podvozky letadel prošly za dobu své existence velkou proměnou. Z původních ližin, přes jednoduché kolové, až po dnešní velmi složité koncepce uspořádání a technické realizace u nejmodernějších letadel. Není pochyb, že na podvozek, jako na velice důležitou část letadla, čekají velké změny a inovace. Stále intenzivní výzkum nových materiálů a slitin spolu s použitím nových technologií (např. magnetické tlumiče s měnitelnou charakteristikou zdvihu).



## Použitá literatura

- [1] PAZMANY, Ladislao. *Landing gear design for light aircraft*. 1st ed. San Diego, Calif.: Pazmany Aircraft Corp., 1986. [cit. 2012-03-13] ISBN 09616777081
- [2] TŮMA, Jiří. *ANS CR TRAINING CENTRE PRAGUE: CENTRAL EUROPEAN AIR NAVIGATION TRAINING AND CONSULTING CENTRE*. Praha, 2000  
[cit. 2012-03-13]
- [3] PETRÁSEK, Miloslav, *Základy konstrukce letadel*, VUT, Brno, 1999  
[cit. 2012-03-11]
- [4] TŮMA, Jiří. *Letadla: Pro učební a studijní obory na SOU*, SNTL, Praha, 1981  
[cit. 2012-04-15]
- [5] Integrated Publishing: Aviation. Integrated publishing [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://navyaviation.tpub.com/14018/css/14018\\_24.htm](http://navyaviation.tpub.com/14018/css/14018_24.htm)
- [6] SLAVĚTINSKÝ, Dušan. O letadlech. *Koncepce přistávacího zařízení* [online]. [cit. 2012-06-12]. Dostupné z: [http://www.slavetind.cz/stavba/koncepce/Koncepce\\_prist\\_zar.aspx](http://www.slavetind.cz/stavba/koncepce/Koncepce_prist_zar.aspx)
- [7] Mlevel3. *Landing Gear, Tires, Wheels, Brakes* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.mlevel3.com/BCIT/Landing%20gear%20notes.htm>
- [8] Undercarriage. In: Wikipedia [online]. Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Undercarriage#Retractable\\_gear](http://en.wikipedia.org/wiki/Undercarriage#Retractable_gear)
- [9] *LMS: Conferences* [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: [http://lmsconferences.lmsintl.com/pdf/TNO\\_Dr.Ir.Besselink.pdf](http://lmsconferences.lmsintl.com/pdf/TNO_Dr.Ir.Besselink.pdf)
- [10] Zenith Air: Anatomy of a STOL Aircraft. HEINTZ, Chris. [online]. [cit. 2012-02-7] Dostupné z: <http://www.zenithair.com/stolch801/design/design.html>



## Seznam zkratek

VPD	Vzletová přistávací dráha
-----	---------------------------